AIK-G-012-2019

대한건축학회 기술표준
STANDARD of Architectural Institute of Korea

갠트리형 3D콘크리트 프린팅 구조설계 지침

Structural Design Guidelines for Gantry Type 3D Concrete Printing

2019.12

사단법인 대한건축학회 부설
한국건축기준센터
KOREAN BUILDING CODE CENTER

사단법인 대한건축학회
ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA

AIK-G-012-2019

갠트리형 3D 콘크리트 프린팅 구조설계 지침

Structural Design Guidelines for Gantry Type 3D Concrete Printing

2019. 12.

사단법인 대한건축학회
ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA

집필위원 명단

구분	성 명	소 속	직 위
(위원장)	홍성걸	서울대	교수
(부위원장)	조창빈	한국건설기술연구원	연구위원
(위 원)	주기범	한국건설기술연구원	선임연구위원
	이호재	한국건설기술연구원	전임연구원
	김남희	서울대	객원교수
	강성훈	서울대	박사후연구원
	박지슬	서울대	박사과정

심의위원 명단

	성 명	소 속	직 위
(위원장)	최 창 식	한양대학교 건축공학부	교수
(부위원장)	이 기 학	세종대학교 건축공학부	교수
(위 원)	홍 건 호	호서대학교 건축토목공학부	교수
	오 상 근	서울기술대학교 건축학부	교수
	강 주 원	영남대학교 건축학부	교수
	강 수 민	숭실대학교 건축학부	교수
	김 남 희	서울대학교 건축학과	객원교수

제정자 : 대한건축학회회장
제 정 : 2019년 12월 30일
개 정 :
고 시 : 제2019-13호
심 의 : 대한건축학회 건축기준센터 기술표준심의위원회
비 고 :

본 기준 또는 표준에 대한 문의는 대한건축학회 건축기준센터로 하실 수 있습니다.

갠트리형 3D 콘크리트 프린팅 구조설계 지침

차 례

제1장 일반사항 01

제2장 3D 콘크리트 재료 03

제3장 설계원칙 06

제4장 토출콘크리트의 구조안전성 07

제5장 경화콘크리트 구조설계 10

부록 1. 토출콘크리트 압축강도 및 압축강도 증가율 평가법 설계원칙 13

부록 2. 토출콘크리트 정적전단강도, 동적전단강도 및 점도 실험실 시험법 16

제1장 일반사항

1.1 목적

이 지침은 겐트리형 3D 콘크리트 프린팅으로 제작하는 구조물을 위한 토출콘크리트와 경화콘크리트의 구조안정성 확보를 위한 구조설계방법을 규정하는 것을 목적으로 한다.

1.2 적용 범위

이 지침은 겐트리형으로 제작되는 적층식 3D 콘크리트 프린팅 구조물의 시공단계과정의 토출콘크리트의 구조안정성과 경화콘크리트구조의 구조설계에 적용할 수 있다.

1.3 용어 정의

경화콘크리트 항복강도 τ_f: 콘크리트의 수화작용과 양생으로 도달한 전단강도(kPa)

기준압축강도: 28일 양생 후 표준실린더 콘크리트 압축강도 f_{ck}

그라우트 : 사출한 벽체 공간의 강도증진을 위한 채움재

노즐수평속도 v_n: 토출구의 수평방향의 이동속도 (mm/sec)

설계압축강도: 기준압축강도에 재료계수를 곱한 값 f_{cd}

소성점도 μ_p:빙햄 유변체 모형에서 전단강도의 증가변수

수직적층속도v_v: 토출층의 수직방향 증가 속도

수직하중 증가 속도 A_σ: 수직방향의 벽체자중으로 발생하는 응력증가 속도

중심선길이 L : 작업영역 각 층의 전체 출력길이 (mm)

초기항복강도 τ_0: 토출 즉시 콘크리트의 전단강도 (Pa)

토출량: 노즐단면적과 토출속도의 곱으로 표현되는 콘크리트 량(mm3/sec)

토출콘크리트 층 높이: 토출 콘크리트의 수직높이 (mm)

토출속도 v_n : 노즐의 수평속도에 해당함 (mm/sec)

토출출력시간 t_h: 한층의 사출층의 완공 시간 (sec)

항복강도 증가 속도 A_{thix}: 유변성 콘크리트의 강도증가율 (Pa/sec)

1.4 기호 정의

τ_f: 경화콘크리트 항복강도(kPa)

f_{ck}: 콘크리트기준압축강도

f_{cd}: 설계압축강도

μ_p :소성점도

v_v: 수직적층속도토출층의 수직방향 증가 속도

A_σ: 수직하중 증가 속도수직방향의 벽체자중으로 발생하는 응력증가 속도

τ_0: 초기항복강도, 토출 직후 콘크리트의 전단강도 (Pa)

v_n : 토출속도 (mm/sec)

t_h: 토출출력시간 (sec)

A_{thix}: 변성 콘크리트의 강도증가율 (Pa/sec)

h : 토출층 높이 (mm)

b : 유효비지지거리 (mm)

H : 부재의 전체 높이 (mm)

A_{nozzle} : 토출구 면적 (mm2)

A_{eff} : 유효 토출층 단면적 (mm2)

L : 중심선길이 (mm)

Q : 토출량 (kg/sec)

1.5 참고 기준 및 표준

이 기준에서 사용하는 재료 및 품질조건은 KS 표준에 따르며 경화콘크리트의 구조성능은 콘크리트구조설계기준 KDS 14 20 21에 따른다.

제2장 3D 콘트리트 재료

2.1 일반

(1) 토출콘크리트의 강도 증가 속도 및 경화 콘크리트의 기준강압축강도는 3D 콘크리트 프린팅 시공기술자에게 보고해야 한다.

2.2 토출콘크리트와 경화속성재료

2.2.1 토출콘크리트

(1) 3D 콘크리트 프린팅의 토출콘크리트는 시공단계에 필요한 형상유지와 적층에 따른 수직응력과 토출콘크리트 상하층간의 요구부착강도 및 기준압축강도를 만족하여야 한다.

(2) 기준강도는 원칙적으로 상온시험 자료의 통계적 분포에서 하위 5% 분위수에 해당하는 값이다.

(3) 시공지침에 따른 기본배합을 사용한 토출 3D 콘크리트 프린팅 기준압축강도 f_{ck}는 500 Pa, 평균압축강도 f_{ck}은 600 Pa을 적용한다.

(4) 토출콘크리트의 시점 토출출력시간의 항복강도와 적층시간에 따른 시간별 항복강도 증가 속도를 제시하여야 한다.

(5) 3D 콘크리트 프린팅의 설계압축강도는 식 (2.1)과 같이 기준압축강도에 재료계수 ϕ_c를 곱하여 구한다.

$$f_{cd} = \phi_c f_{ck} \qquad (2.1)$$

여기서, 3D 콘크리트 프린팅의 재료계수 ϕ_c는 압축에 대하여 0.9를 적용한다.

2.2.2 경화속성재료

(1) 토출콘크리트의 형상유지 및 적층콘크리트 자중의 수직응력에 따른 구조안정성을 제어하기 위하여 콘크리트 경화속성재를 사용할 수 있다.

(2) 경화속도는 적층간의 필요한 접착강도를 만족하여야 한다.

(3) 경화후 콘크리트 강도는 설계압축강도를 만족해야 한다.

2.2.3 경화콘크리트

2.2.3.1 경화콘크리트의 압축강도

(1) 경화콘크리트의 기준압축강도는 원칙적으로 고온습윤양생 종료 후 이 지침의 부록에 규정된 시험 방법에 의해 획득한 실제 시험 자료의 통계적 분포에서 하위 5% 분위수에 해당하는 값이다.

(2) 토출콘크리트가 상온에서 양생되어 토출콘크리트의 기준압축강도, f_{ck}가 20 MPa 이상에 도달하면 경화콘크리트로 다룰 수 있다.

(3) 그라우트의 기준압축강도 f_g 는 13 MPa 이상이어야 하며 35 MPa를 초과할 수 없다.

2.2.3.2 경화콘크리트의 쪼갬인장강도

(1) 기본배합 및 고온습윤양생으로 제작한 3D 콘크리트의 기준인장강도 f_{tk}는 7.0MPa을 적용한다.

(2) (1)을 만족하지 않는 경우 쪼갬 인장강도 f_t는 식(2.2)으로 결정한다.

$$f_t = 0.2\sqrt{f_{ck}} \qquad (2.2)$$

2.2.3.3 경화콘크리트의 파괴계수

경화콘크리트의 파괴계수, f_r은 쪼갬인장강도, f_t의 2 배로 한다.

2.2.3.4 마찰 계수

토출콘크리트의 상하층간 계면마찰 계수는 0.75로 간주한다.

2.3 인장보강재

경화 후 3D 콘크리트 프린팅 구조재의 인장강도 확보를 위해 철근, 섬유보강재 등을 사용할 수 있다. 인장보강재는 다음과 같은 성능을 만족하여야 한다.

(1) 소요 인장강도
(2) 연성도
(3) 콘크리트와의 부착강도

2.3.1 철근

3-D 콘크리트 프린팅 부재의 설계는 철근의 항복강도 f_y를 근거로 하며, 400 MPa를 초과하지 않아야 한다. 또한 철근의 실제 항복강도는 설계에 사용한 항복강도의 1.3배를 초과하지 않아야한다.

2.3.2 섬유 보강재

(1) 토출콘크리트 및 경화콘크리트의 인장강도 및 연성도 증진을 위해 파이버 콘크리트에 사용하는 강섬유 및 화학섬유재를 추가할 수 있다.

(2) 섬유보강 3D 콘크리트는 이 지침 2장에서 규정한 3D 콘크리트 재료에 대한 토출 및 경화콘크리트의 요구사항을 만족하여야 한다.

2.3.4 휨강도

1) 휨강도용 시험체 제작방법

(1) 공시체의 치수

공시체는 단면이 정사각형인 각주로 하고, 그 한 변의 길이는 100mm 이상으로 하고, 공시체의 길이는 단면의 한 변 길이의 3배보다 80mm 이상 긴 것으로 한다. 일반적으로 공시체는 100×100×400mm를 사용한다.

(2) 공시체의 제작

몰드는 수평으로 설치하고, 타설은 몰드의 길이방향으로 복합재료 내부에 갇힌 공기가 발생하지 않도록 윗면까지 천천히 연속적으로 채운다. 타설범위는 최대 휨모멘트 구간을 고려하여 몰드의 단부로부터 L/4(L : 공시체 길이) 이내로 한다. 타설할 때 합류부가 최대 휨모멘트 구간에 해당하면 취약부가 되므로 몰드의 양단에서 타설하지 않도록 한다. 다짐방법은 2.3.1. 2)의 압축강도 공시체 제작방법과 동일하다.

제3장 설계원칙

3.1 일반사항

3D 콘크리트 프린팅 구조물의 구조설계는 토출콘크리트에 대한 시공단계별 구조안정성평가와 경화콘크리트의 구조설계를 모두 포함한다.

(1) 토출콘크리트의 구조안정성은 시공 단계별 재료특성을 고려하여 구조물의 평형조건 및 항복조건을 만족하여야 한다.

(2) 경화콘크리트의 구조부재를 설계할 때 사용하는 설계하중 및 하중조합은 구조물의 종류에 따라 제정되어 있는 관련 설계기준을 적용한다.

(3) 강도 및 구조해석은 이 지침을 적용하고 이 지침에 규정되어 있지 않은 사항은 KDS 14 20 10(콘크리트구조 해석과 설계원칙)을 적용한다.

(4) 3D 콘크리트의 단위중량은 24.0kN/m3을 적용한다.

(5) 시공단계별 토출콘크리트 높이는 토출콘크리트의 자중을 고려하여 토출단면의 초기형상 변화를 고려하여 결정하여야 한다.

3.2 경화콘크리트 구조설계하중

(1) 고정하중 및 활하중을 포함하여 지진, 바람하중을 고려한 하중조합에 적합한 강도설계법으로 단면의 크기 및 구조 안정성을 확인한다.

3.3 강도

(1) 구조부재의 설계강도는 모든 단면에서 하중조합에 의해서 계산된 소요강도 이상이어야 한다.

(2) 구조부재의 설계강도는 안전계수를 적용하여 산정하여야 한다.

3.4 구조해석

3D 콘크리트 구조부재의 해석은 KDS 14 20 10(콘크리트구조 해석과 설계원칙)에 따른다.

제4장 토출콘크리트의 구조안정성

4.1 일반사항

3D 콘크리트 프린팅으로 제작되는 구조물은 시공단계 토출콘크리트의 구조안정성 평가를 통하여 토출콘크리트의 토출층 높이와 적층속도를 산정해서 시공단계 구조안정성을 확보하도록 한다.

4.1.1 제작시공도면

(1) 3D 콘크리트 프린팅 구조물의 설계도면을 토대로 목표 제작시간, 제작방식에 따른 작업공간과 토출콘크리트의 재료 특성을 고려하여 제작시공도면 작성하여야 한다.

(2) 제작구역은 단위 토출층의 토출길이와 적층속도를 고려해서 구분하여야 한다.

(3) 토출콘크리트의 적층속도는 토출량, 토출층 높이, 토출구 수평이동속도를 함께 고려해서 최적의 값으로 결정된다.

(4) 토출량과 토출구의 이동속도는 토출콘크리트의 점도와 이송관 크기와 길이를 고려하여 결정하여야 한다.

4.1.2 토출량과 콘크리트재료 점도

토출콘크리트의 점도와 이송관 크기 및 길이를 고려하여 토출량과 토출구의 이동속도를 결정하여야 한다. 토출량과 토출구 이동속도, 토출구 단면적의 관계는 다음과 같다.

$$Q = \rho A_{nozzle} v_n / 10^9 \text{ (kg/sec)} \qquad (4.1)$$

여기서, ρ는 토출콘크리트의 밀도 (kg/m3), A_{nozzle}은 토출구 단면적 (mm2), v_n은 토출속도 (mm/sec)

4.2 토출층 높이

토출층 높이는 토출콘크리트의 항복강도와 토출속도가 최적화될 수 있도록 결정하여야 한다. 시험결과 산정한 항복강도에서 토출층이 자중에 저항하기 위한 토출층 최대높이는 다음과 같다.

$$h_{\max} = \frac{1000}{\sqrt{3}} \frac{\tau_0}{\rho g|} \text{ (mm)} \qquad (4.2)$$

여기서, ρ는 토출콘크리트의 밀도 (kg/m3), g는 중력가속도 (m/sec^2), τ_0는 초기항복강도 (Pa)

4.3 최대적층속도

적층콘크리트 구조는 적층하부의 압축파괴와 적층벽체의 좌굴강도로 최대적층속도와 최대적층높이를 결정해야 한다.

4.3.1 적층콘크리트의 재료항복

토출콘크리트 단면형상 변화의 최소화와 안정성을 확보를 위해 적층높이에 따라 증가하는 수직응력은 토출콘크리트의 항복강도를 초과할 수 없다. 토출콘크리트의 강도발현속도에 따른 적층속도 상한값을 결정해야 하며 최하단의 토출층의 항복강도 하한값은 다음 값을 만족해야 한다.

$$\tau_{0,f} = \rho g H_m / \sqrt{3} \tag{4.3}$$

토출콘크리트의 초기항복강도 값이 (4.3) 보다 작은 경우, 재료의 강도발현속도를 산정하여 최소토출 출력시간을 만족해야 한다.

$$A_{thix} = \rho g H / \sqrt{3}\, t_{H,\min} = \rho g h / \sqrt{3}\, t_{h,\min} \tag{4.4}$$

$$v_{n,\max} = \sqrt{3}\, L A_{thix} / (\rho g h) \tag{4.5}$$

4.3.2 적층콘크리트 구조안정성

토출콘크리트 적층벽구조의 수직최대높이는 토출콘크리트의 재료특성 및 벽체의 경계조건에 따라 최대좌굴높이와 이에 따른 적층속도의 상한값을 결정해야 한다.

4.4 최소적층속도

경화콘크리트 층간 재료연속성은 적층계면의 부착강도의 최소값을 유지하여야 한다. 적층계면 부착강도 확보를 위해 토출콘크리트 강도발현속도에 따른 적층속도의 하한값을 결정해야 한다. 자기 다짐 콘크리트의 이어치기에서 콜드조인트가 발생하지 않기 위한 토출출력시간의 상한값은 다음과 같이 산정한다.

$$t_{h,\max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho g h)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h}\right)^2}}{A_{thix}} \tag{4.6}$$

토출 직후 콘크리트의 전단강도가 작업 중 일정하다는 가정 하에, 초기 항복응력을 고려한 토출출력시간의 상한값은 다음과 같이 산정한다.

$$t_{h,\max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho g h)^2}{12} + \left(\tau_0 + \frac{2\mu_p V}{h}\right)^2} - \tau_0}{A_{thix}} \tag{4.7}$$

4.5 인장보강재

경화콘크리트의 인장강도 확보 및 구조물의 휨강도 및 인장강도 확보를 위해 적절한 인장보강재를 설치할 수 있다.

제5장 경화콘크리트 구조설계

5.1 축력

부재 단면에 작용하는 축응력의 평균값은 허용응력 또는 강도보다 작아야 한다. 단 콘크리트의 인장강도는 무시한다.

공칭압축강도 (P_n)는 식(5.1) 또는 식(5.2.)을 사용한다.

(1) h/r 비가 99 이하인 부재의 경우 :

$$P_n = 0.80\left\{0.85A_n f_{cd}\left[1-\left(\frac{1}{140r/h}\right)^2\right]\right\} \qquad (5.1.)$$

(2) h/r 비가 99를 초과하는 부재의 경우 :

$$P_n = 0.80\left\{0.85A_n f_{cd}\left[1-\left(\frac{70}{h/r}\right)^2\right]\right\} \qquad (5.2)$$

여기서 A_n은 벽체의 단면, r/h는 세장비를 나타낸다.

5.2 휨모멘트

적층부재의 평행한 단면과 직각인 단면에 대하여 휨모멘트에 저항하는 보, 슬래브, 벽체에 대한 단면산정과 부재의 휨 강도 산정은 다음 가정을 따른다.

(1) 계수 휨 및 계수 축하중에 대한 부재설계는 역학이론에 따라야 한다.

(2) 단면의 변형은 중립축으로 부터의 거리에 비례한다.

(3) 부재의 휨 인장은 변형에 비례한다.

(4) 축방향 압축응력과 휨응력은 변형에 비례하며 공칭압축강도는 $0.85f_{cd}$에 해당하는 응력을 초과하지 않아야 한다.

(5) 콘크리트 공칭 휨인장 강도는 KDS 14 20 콘크리트구조 설계기준에 따른다.

5.3 전단설계

(1) 적층부재의 전단강도는 적층과 평행한 단면과 직각에 작용하는 전단응력에 대하여 계면전단를 고려하여 전단강도를 산정한다,

(2) 전단강도 V_{nc}는 계산 값 중 가장 작은 값을 사용한다. 3D 콘크리트의 공칭 전단강도 산정에서 보강효과는 무시한다. 다음 규정은 면외력을 받는 벽체강도 산정에 적용한다.

(3) 전단강도 V_n은 식(5.3)에서 식(5.5)으로 주어진 조건에 따라 최소값으로 산정한다.

$$V_n = V_{nc} + V_{ns} \qquad (5.3)$$

V_{ns}는 간격 s_v의 수평보강근의 전단강도 기여분으로 $\frac{A_{sh} f_y}{s_v} d_w \cot\theta$로 산정할 수 있다. 일반적으로 $\cot\theta = 1$를 적용한다.

여기서 V_n은 다음을 초과하지 않아야한다.

① $V_n = \mu_c P_u$

경량기포콘크리트 개체와 박판 모르타르 또는 후판 모르타르 접합면에서 미끄럼 전단 강도는 마찰계수를 사용하여 전단강도를 구한다.

② $M_u / (V_u d_v) \leq 0.25$일 때,

$$V_n \leq 0.5 A_{nv} \sqrt{f_{cd}} \qquad (5.4)$$

③ $M_u / (V_u d_v) \geq 1.0$일 때,

$$V_n \leq 0.33 A_{nv} \sqrt{f_{cd}} \qquad (5.5)$$

④ $M_u / (V_u d_v)$에 대한 V_n의 최대값은 0.25와 1.0 사이에서 선형보간한다.

부 록

부록-1 토출콘크리트 압축강도 및 압축강도 증가율 평가법

1. 목적과 적용범위

(1) 이 평가법은 겐트리형 3D 콘크리트 프린팅으로 제작하는 토출콘크리트의 압축강도 시험에 대하여 규정한다.

(2) 이 평가법은 3D 콘크리트 프린팅 토출콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 전단강도의 근사치를 제공한다.

(3) 이 평가법은 겐트리형 3D 콘크리트 프린팅 구조물의 시공단계과정의 구조안정성 평가에 적용할 수 있다.

참고 1] 이 평가법은 구속력이 없는 상태에서 자중에 의한 변형이 과도하게 발생하지 않을 정도의 충분한 강도 및 강성을 가진 경우에 적합하다. 재료의 강도 및 강성이 매우 작아 시험체의 형상이 유지되지 않는 경우, [부록 2] 토출콘크리트 전단강도 평가법의 결과로부터 압축강도를 추정할 수 있다.

참고 2] 토출콘크리트 시험체는 이송된 재료를 토출기로 제작하거나 교반된 재료를 거푸집에 타설하여 성형할 수 있다. 또한, 두 시험체의 결과를 비교하여 재료의 민감도를 평가할 수 있다.

2. 시험기구

(1) 압축 장치로 나사-잭 구동기, 유압식 구동기 등 하중 및 하중 속도를 구현할 수 있는 장비를 사용할 수 있다. 압축 장치는 최대 응력 값을 3개의 유효 자릿수로 측정할 수 있어야 하며, 구동기를 사용하는 경우 최대 압축력이 로드셀 용량의 1% 이내가 되도록 한다.

(2) 토출기는 시험체의 길이 방향으로 재료 교란을 억제하여 균일한 속도로 토출할 수 있어야 한다. 시공에 사용되는 토출 장비의 노즐을 변형하여 활용할 수 있다.

(3) 거푸집에 타설하여 시험체를 성형하는 경우 탈형 시 재료의 교란을 방지하기 위해 거푸집 내부에 테플론 시트 부착으로 발생하는 마찰력을 최소화하여야 한다. 공시체 길이 방향 탈형으로 토출을 모사할 수 있도록 적절한 장치를 구성해야 한다. 탈형 시 시험체 모선 부의 긴결재를 제거하는 방식은 권장하지 않는다.

(4) 다이얼 게이지와 같이 시험체 크기의 0.1% 이내의 정확도로 변형을 측정할 수 있는 측정장치를 사용한다. 디지털 이미지 연관기법을 변형 측정 결과의 교차 검증과 균열 시점 파악에 활용할 수 있다.

3. 시험체 준비

(1) 재료 토출 직후부터 아래의 시간 중 최소 시간까지 30분 간격으로 측정하는 것을 기본으로 하되, 선형보간법을 적용할 수 있도록 측정 시점을 3개 이상 결정한다.

1) 토출콘크리트 강도 70kPa에 도달하기까지의 시간

2) 수화열 측정을 통해 결정된 수화가속 시작시각

3) 초음파속도 측정, 비카트 시험을 통해 측정된 초결시간

4) 1회 시공시간

(2) 시험체의 개수는 각 측정 시점별 3개 이상으로 한다.

(3) 시험체 치수는 다음을 고려하여 결정한다. 시험체의 지름은 최소 30mm 이상 또는 재료의 최대 골재 크기의 크기가 지름의 1/10을 초과하지 않도록 한다. 시험체의 지름이 72mm 이상인 경우 재료의 최대 골재 크기가 지름의 1/6을 초과하지 않도록 한다.

(4) 토출기로 시험체를 제작하는 경우 노즐이 시험체의 세로축과 평행하도록 위치시켜 재료를 토출하고, 토출속도는 0.1mm/s 로 매우 작게 유지한다. 시험체의 단면이 세로축과 수직이 되도록 절단하되, 재료가 교란되지 않도록 유의한다. 시험체의 치수와 중량을 측정하여 단위 중량을 계산해야 한다. 양생 시간 동안 폴리에틸렌제의 얇은 막 등을 활용하여 표면의 수분 증발을 방지한다.

(5) 교반된 재료를 거푸집에 타설하여 성형되는 시험체의 경우 재료를 세 번에 나누어 담고 가볍게 다짐을 한다. 이 때, 토출된 재료와 동일한 단위 중량을 가지도록 주의한다. 양생 시간동안 거푸집 위를 얇은 막 등으로 밀봉하여 수분 증발을 방지한다.

4. 시험방법

(1) 시험체를 아랫부분 가압판 중앙에 위치시키고 윗부분 가압판을 시험체의 면과 맞닿도록 조정한다. 변형을 측정할 수 있는 장치를 설치하고 시간에 따른 하중과 변형을 기록한다. 재하 속도는 분당 변형률이 0.5%에서 2% 사이가 되도록 한다. 재료가 상대적으로 무른 경우 재하 속도가 높은 것을 권장하고 된 비빔의 경우 재하 속도가 낮은 것이 권장된다. 하중이 감소하거나 변형률이 15%에 도달할 때까지 재하하며 재료의 강도발현이 시험 결과에 영향을 주지 않도록 재하 시간은 10분 이내가 되도록 한다.

(2) 시험 중 시험체가 받은 최대 하중을 기록하여야 하며, 시험체의 파괴 상태와 겉모양을 사진 또는 그림으로 기록한다.

5. 평가

(1) 압축변형률 ε1은 가력 하중에 대해 다음과 같이 계산하며 0.1% 까지 표기한다.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_O} \times 100$$

ΔL = 변형 표시 장치에서 읽거나 계산된 시험체의 변형된 길이(mm)

L0 = 시험체의 초기 길이 (mm)

(2) 평균 단면적 A는 가력 하중에 대해 다음과 같이 계산하나 보수적 산정을 위해 생략할 수 있다.

AO = 시험체의 초기 평균 단면적(mm)

$$A = \frac{A_O}{\left(1 - \frac{\varepsilon_1}{100}\right)}$$

ε1 = 주어진 하중에 대한 축 변형률, %.

(3) 압축응력 σ_c는 다음과 같이 계산하며 3개의 유효 자릿수 또는 1 kPa 단위까지 표기한다.

P = 가력 하중(N)

$$\sigma_c = (P/A)$$

A = 평균 단면적(mm2)

(4) 필요한 경우 변형률에 대한 응력 그래프를 그리고 압축응력의 최댓값 또는 변형률 15% 에서의 응력을 압축강도로 정의한다.

(5) 토출된 시험체와 거푸집으로 성형된 시험체로 압축강도를 측정한 경우 아래와 같이 민감도를 계산할 수 있다.

$$S_T = \frac{q_u(\text{토출된 시험체})}{q_u(\text{성형된 시험체})}$$

부록 2 토출콘크리트 정적전단강도, 동적전단강도 및 점도 실험실 시험법 (Laboratory test)

1. 목적과 적용범위

(1) 이 평가법은 겐트리형 3D 콘크리트 프린팅으로 제작하는 구조물을 위한 토출콘크리트의 정적전단강도, 동적전단강도 및 점도 시험법에 대하여 규정한다.

(2) 이 평가법은 겐트리형 3D 콘크리트 프린팅으로 제작하는 구조물의 시공단계과정의 구조안정성 평가에 재료특성으로 적용할 수 있다.

2. 시험기구

(1) 굳지 않은 콘크리트의 특성을 측정하기 위한 시험기구는 시료 컨테이너와 베인 날로 구성되어 하나는 지정된 속도로 회전하며 다른 하나는 고정되어야 한다.

(2) 베인 날은 4-6 개 직사각형 날으로 구성되어 베인의 높이와 지름의 비는 2:1에서 1:1이 되도록 한다.

(3) 시료 컨테이너 벽면에 시료의 미끄러짐을 방지하기 위한 처리를 할 수 있다.

(4) 장비의 모터는 일정 전단속도 시험과 변형제어 및 변형제어를 할 수 있어야 한다.

3. 시험체 준비

(1) 계획한 시험체 재료를 준비하여 시멘트와 배합수가 배합하기 시작한 시점부터 시간을 측정한다.

(2) 배합 직후 시료 컨테이너에 담고 측정이 시작한 시점을 기록한다.

4. 시험 방법

(1) 시료 컨테이너를 테이블에 고정시켜 움직이지 않도록 한다. 시료의 높이는 최소 베인 날 높이의 두 배가 되도록 준비한다.

(2) 초기 측정값 읽는다. 회전을 막기 위해 샘플을 단단히 고정한다.

(3) 측정 직전 다짐봉으로 1분간 무작위 다짐을 통해 재료의 균질성을 최대로 확보한다.

(4) 정상상태 전단실험을 통한 정적항복응력 측정을 위해 일정한 전단율을 주고 전단응력이 정상상태에 도달할 때까지 측정한다. 시료가 요변성 유체인 경우 최대 전단응력을 정적항복응력으로 산정한다. 요변성 유체가 아닌 경우 정상상태에 도달했을 때의 전단응력을 정적항복응력으로 산정한다. 요변성 유체인 경우 정상상태 전단실험을 통

해 얻은 정적항복응력과 (4) 또는 (5)의 실험을 통해 얻은 동적항복응력이 차이가 있다.

(5) 정상상태 전단실험을 통한 동적항복응력 및 점도 측정을 위해 일정한 전단율을 주고 전단응력이 정상상태에 도달할 때까지 측정한다. 전단율에 대한 전단응력을 선형 함수로 근사하여 절편을 동적항복응력, 기울기를 점도로 구한다.

(6) 변형제어 실험을 통한 동적항복응력 및 점도 측정을 위해 전단 속도를 선형으로 증가시키며 전단응력을 측정한다. 전단율에 대한 전단응력을 선형 함수로 근사하여 절편을 동적항복응력, 기울기를 점도로 구한다.

참고 1] 5 rpm과 50 rpm에서의 점도 비를 산출하여 요변성 지수(TI)을 측정할 수 있다.

참고 2] 전단 속도를 선형으로 증가, 감소시키며 전단응력을 측정한다. 전단율에 대한 전단응력 그래프의 루프 내 면적으로 요변성 면적을 측정하여 요변성을 평가할 수 있다.

대한건축학회 기술표준

STANDARD of Architectural Institute of Korea

사단법인 대한건축학회 부설
한국건축기준센터
KOREAN BUILDING CODE CENTER

사단법인 대한건축학회
ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA